

文章编号 1004-924X(2012)11-2507-09

分块峰值点局部区域生长的星像提取

王海涌^{1*}, 武文卿¹, 薛晓峰², 赵彦武¹

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;

2. 空军指挥学院 战役系, 北京 100097)

摘要: 为了获得高精度、高更新率的抗噪声性能, 对星敏感器星像提取环节进行了研究。首先, 分析星图中星像灰度的分布特点, 建立了判断某个像素是否与峰值像素归属同一星像的标准。然后, 介绍了像元阵列分块方法和背景预测法。最后, 结合星像的特点提出了以峰值点为种子点的区域生长准则。仿真实验结果表明, 在不加噪声的情况下, 提取出的星像与参考星图完全一致, 用质心法得到的亚像素定位精度为 0.028 2。在添加均值为 20、标准差高达 2.5 的强高斯灰度噪声的情况下, 提取率仍能达到 86.11%, 质心精度则下降到 0.219 6 pixel。均匀性很差, 信噪比低于 4.9 dB 的实拍星图实验结果也证明该方法有很强的星像提取能力和准确性, 能够满足强噪声弱星像质心提取的强抗干扰能力的要求。

关键词: 星敏感器; 质心提取; 分块; 区域生长法; 高斯分布; 星图处理

中图分类号: V448.22; TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122011.2507

Star image extracting based on local region growing around peaks in blocks

WANG Hai-yong^{1*}, WU Wen-qing¹, XUE Xiao-feng², ZHAO Yan-wu¹

(1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Department of Battle, Air Force Command College, Beijing 100097, China)

* Corresponding author, E-mail: wh_y@buaa.edu.cn

Abstract: To improve the precision, update rate and the anti-noise ability of star sensors, this study was focused on the extraction of star images. Firstly, the criterion to confirm whether a pixel attributes to the same star coverage with the local maximum pixel was established according to the gray distributing features of star images. Then, several kinds of methods for image extraction were introduced, such as the block division of imaging array, and the prediction of background noise. Finally, by regarding the peak value pixel as the origin of the circular region growing, the local region growing criterion was set up successfully based on the gray distributing features of star images. The simulation conducted in the case of no noises shows that all of the simulated star images in the reference star map can be extracted successfully, and the sub-pixel location accuracy is 0.028 2 pixel by using centroid

收稿日期: 2012-06-20; 修订日期: 2012-08-04.

基金项目: 航空科学基金项目 (No. 2007ZC51027)

method. Moreover, under upmost adverse condition with a Gaussian noise mean value of 20 and standard variance as high as 2.5, the success extraction rate can still reach 86.11% with a decreased centroiding accuracy of 0.219 6 pixel. The test about a faint star image in a star map with poor uniformity and a low SNR of 4.9 dB also proves the excellent detection ability of the proposed method, and it shows advantages of good real-time property and high correct extracting rate for star images.

Key words: star sensor; star image extracting; blocking; region growing; Gaussian distribution; star map preprocess

1 引言

星光定姿一般包括星图预处理、质心提取、星图匹配和定姿解算等几个处理过程,质心提取是星光定姿算法的重要一环,其提取能力、速度和精度是星敏感器性能的决定性因素之一。质心提取包含 2 个步骤,粗提取和亚像素定位。星图亚像素定位主要有基于灰度的质心法、曲面拟合法等^[1]。星像是由毗连的几个像素组成的,基于区域分割技术的星像粗提取是亚像素定位的前提,是星图预处理中长耗时的一环,严重影响星敏感器的实时性和数据更新率。同时,粗提取能否最大程度地还原星图中的实际星像像素分布和灰度大小也是影响质心定位精度的重要因素。

目前星像粗提取的主要方法有扫描法^[1]和矢量法^[2]。扫描法先进行阈值分割,再通过连通域分析获得星像区域的像素,耗时较长。矢量法经过一次行列扫描得到候选星的特征像素(如最大值点或相邻灰度差最大点)位置,再用模板或连通性分析获得星像区域的像素^[3-4],当星图中包含噪声时其提取的星数会迅速达到上限。因而文献^[5]先进行滤波再进行星像提取,期望提高抗噪声性能,代价是全局滤波的高耗时。文献^[6-7]一定程度提高了精度和抗干扰性,但受模板形状和搜索区域的限制,适用性不够。文献^[8]提出背景预测方法处理背景噪声,然后通过阈值分割及连通域方法来提取星像。背景处理和连通域分割的过程都很耗时。文献^[9]采用形态学处理灰度,容易改变原有星像灰度的值,造成质心提取的精度下降,其精度只有 0.3 pixel。

本文提出一种新的星像提取方法,将常规提

取方法中消除非均匀性、去噪和星像区域分割提取等过程一次性完成,大大节约了处理时间从而提高了实时性。同时,提高了抗噪声性能,并尽可能保证星像提取的准确性。

2 方法原理

2.1 星像判断标准

理想情况下,在传感器光敏面上的星光照度分布近似符合高斯分布^[10]:

$$E(x, y) = \frac{\Phi}{2\pi\sigma_{\text{PSF}}^2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma_{\text{PSF}}^2}\right], \quad (1)$$

其中: (x_0, y_0) 为高斯光斑的中心点坐标, Φ 为星光在探测器上的辐射功率, σ_{PSF} 为高斯半径,表示点扩散函数的能量集中度。

对于公式(1),当 y 取任一常值 C 时,得到如下形式:

$$E(x, y) = \frac{\Phi'}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{PSF}}} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_{\text{PSF}}^2}\right]$$

$$\text{其中: } \Phi' = \frac{\Phi}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{PSF}}} \cdot \exp\left[-\frac{(C-y_0)^2}{2\sigma_{\text{PSF}}^2}\right] \leq \Phi.$$

Φ' 为一个常数。此时,相当于 $y=C$ 的 $x-z$ 平面上服从 $N(x_0, \sigma_{\text{PSF}}^2)$ 的一维高斯分布,不同 y 值的高斯分布形状一样,只是幅度不同。所以以一维高斯分布为例,分析峰值像素和邻域像素的能量。

如图 1 所示,纵坐标为归一化的光辐射能量强度,横坐标单位为像素。根据实际能量高斯分布的中心点 μ 与峰值像素的相对位置不同,考察相邻像素 $X(-1)$ 的灰度 $I(-1)$ 与峰值像素 $X(0)$ 的灰度 $I(0)$ 比值 $f(\mu) = I(-1)/I(0)$,当 $\mu \in [1, 2]$ 时,关系图如图 2。可以看出当 $\mu=2$ 时,比值

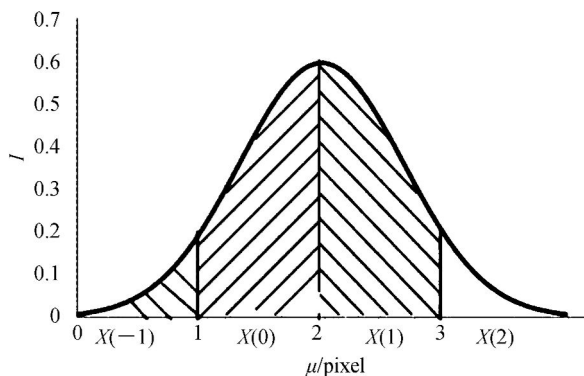


图 1 能量高斯分布中心与像素相对位置的示意图
Fig. 1 Schematic of Gaussian center location on pixel

最小,即图 1 所示情形。对于相隔像素与峰值像素的灰度比规律也是如此。

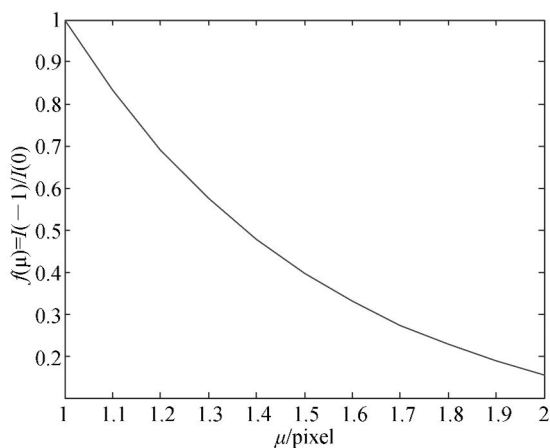


图 2 相邻像素 X(-1)与峰值像素 X(0)的灰度比与高斯中心点的关系
Fig. 2 Relation between gray ratio of adjacent pixel to peak pixel and Gaussian center

为了提取星像 99.7% 以上的能量,星像区域需要包含到 $3\sigma_{\text{PSF}}$ 处。假设高斯分布的标准差 $\sigma_{\text{PSF}} = 0.671$,则 $3\sigma_{\text{PSF}} = 2.013$,即峰值像素到 $3\sigma_{\text{PSF}}$ 处跨越两个像素。设 K 为 $3\sigma_{\text{PSF}}$ 以外的像素所占灰度与峰值像素灰度之比,当待验证像素与峰值像素的灰度之比大于 K 时,则认为是星像区域的内点,小于等于 K 时则认为是外点。取 K 的极限情况,以图 1 所示情形构建判定标准是合理的。

假设 $\Phi(x)$ 是正态概率积分函数:

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{v^2}{2}\right\} dv, \text{ 其值可以查}$$

正态分布表。

遵从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 的随机变量落在 $[\beta_1, \beta_2]$ 内的概率为:

$$P(\beta_1 \leq \xi \leq \beta_2) = \Phi\left(\frac{\beta_2 - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\beta_1 - \mu}{\sigma}\right). \quad (2)$$

图 1 中星像能量符合分布 $N(2, 0.671^2)$, 所以:

$$K = \frac{I(-2)}{I_{\text{max}}} = \frac{I(-2)}{I(0)} = \frac{P(-1 \leq \xi \leq 0)}{P(1 \leq \xi \leq 2)} = \frac{\Phi\left(\frac{0-2}{0.671}\right) - \Phi\left(\frac{-1-2}{0.671}\right)}{\Phi\left(\frac{2-2}{0.671}\right) - \Phi\left(\frac{1-2}{0.671}\right)} = 0.0033,$$

其中: I_{max} 对应 $I(0)$, 表示峰值像素灰度值, $I(-2)$ 表示峰值像素左边第二个像素的灰度值。

所以判断某个像素是否与峰值像素为同一星像的标准是:

$$\begin{cases} \text{星像内点, if } I/I_{\text{max}} > K \\ \text{星像外点, if } I/I_{\text{max}} \leq K \end{cases} \quad (3)$$

考虑到实际星图有不均匀性的影响,所以改变上式的形式,由于两个像素离得很近,可以近似认为受不均匀性的影响是相同的。上式转化为如下形式:

$$\begin{cases} \text{星像内点, if } I_{\text{max}} - I < (1 - K) I_{\text{max}} \\ \text{星像外点, if } I_{\text{max}} - I \geq (1 - K) I_{\text{max}} \end{cases} \quad (4)$$

实际星图不仅存在不均匀性,而且叠加有各种噪声,公式(4)做差的方法,可以消弱背景不均匀性及其它成分噪声的均值误差影响。综合考虑背景噪声均值和标准差的影响采用如下公式:

$$\begin{cases} \text{星像内点, if } \Delta < b(I_{\text{max}} - I_{\text{mean}} - \alpha \cdot \sigma_b) \\ \text{星像外点, if } \Delta \geq b(I_{\text{max}} - I_{\text{mean}} - \alpha \cdot \sigma_b) \end{cases}, \quad (5)$$

其中: $\Delta = I_{\text{max}} - I$, $b = 1 - K$, I_{mean} 是背景灰度的均值, σ_b 是背景标准差, $I_{\text{mean}} + \alpha \cdot \sigma_b$ 为一种自适应阈值^[11], α 根据探测需求调整,在此取 2~4。

2.2 分块及背景预测方法

分块是为了求取峰值点,将峰值点作为生长种子点,然后进行局部区域生长确定星像区域。传统的求取峰值点提取星像的方法是在整个星图中扫描,不断求取最大值^[12],将最大值点作为核

心点,然后用某种形状的模板初步确定区域,再用连通性判断确定星像区域^[3]。这种方法的优点是可以按照亮度从高到低依次提取出星,缺点是对图像背景均匀性比较差的情况处理效果不好,且容易出现几颗星非常接近的情况,以至星对角距太小不符合导航星库的最小角距要求。新的峰值点分块方法,充分考虑到星图匹配角距要求。比如要求角距小于等于 1° ,对于 $20^\circ \times 20^\circ$ 的视场,不多于 20×20 块,则在单一区内角距 1° 内不会出现 2 颗星。区块越小,解算的背景电平和标准差越能代表该区块。完成该过程只需一次全图扫描,消耗时间较少;局部判定阈值的建立,可以削弱非均匀图像背景的影响,也有利于提取星等较暗的星。

背景预测应用于已选定的有限个星像的局部区域生长过程中,区域生长不受之前划分区块的限制。背景预测的基本思想是图像背景的灰度值可以用它周围像元的灰度值进行预测^[8]。一般的背景预测方法有固定权值法和分块权值法,这两种方法都是在要预测的像素周围一圈内取点,是针对一般情况的。本方法是基于星像能量高斯分布的特点,预测峰值点周围的像素的背景,所以不能简单地取周围一圈的点,而要根据被预测点和峰值点的位置关系来取点。由于高斯分布的特点是峰值点灰度值较大,周围像素离峰值点越远灰度值衰减越大,星点光斑直径一般是 $3 \sim 5$ pixel。所以为了避免星像内的像素干扰预测结果,要在

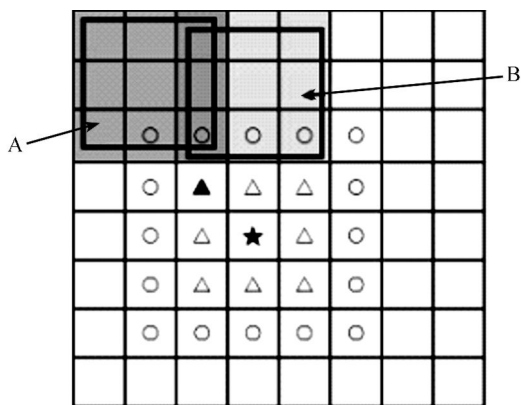


图 3 局部区域生长示意图

Fig. 3 Schematic of local region growing

被预测像素的外围求取背景值。如图 3 所示,图中标记为“★”的像素是峰值点,对标记为“▲”的像素进行预测,A、B 两个区域为预测“▲”像素的背景取样区域。分别求区域 A 和 B 的均值和标准差,取均值最小者为背景噪声均值,记为 I_{mean} ,标准差为 σ_b , $I_{\text{mean}} + \alpha \cdot \sigma_b$ 作为背景噪声预测值。

2.3 分块峰值点局部区域生长准则

区块峰值点获得后,是否可以作为生长种子点需要判定,然后围绕种子点进行局部区域生长,生长终止的条件也需要设立,从而最后确定星像区域。步骤如下:

Step1:全图分成 $N_x \times N_y$ 块,并对每块求取灰度峰值点。

Step2:判断分块的峰值点是否可以作生长种子点。

设 M_{block} 为该块的灰度均值, σ_{block} 为该块的灰度标准差,以自适应阈值 V_{th} 判断, $V_{\text{th}} = M_{\text{block}} + \beta \cdot \sigma_{\text{block}}$, β 根据信噪比进行取值,信噪比越大, β 取值越小。若峰值点灰度 I_{max} 与背景非常接近,则认为星的亮度太低,不进行提取。根据实验验证, β 一般取 $4 \sim 6$ 。若该峰值灰度小于等于 V_{th} ,则不生长;否则,判断该峰值像素是否已经属于某颗星,如果是则不生长,如果不是,则进入 Step3。

Step3:以峰值点为种子点进行区域生长。

如图 3,记灰度峰值点的坐标为 (x_0, y_0) ,灰度值为 I_{max} ,扫描半径为 Radius,比如 Radius=1 时进行第 1 圈扫描,对标记为“△”的像素进行生长判断。生长步骤如下:

(1)对于本圈按照上行、左列、下行、右列的顺序逐个像素进行扫描,若全部扫描完,进入步骤(5);若没有扫描完,进入步骤(2)。

(2)对待生长点进行背景预测,得到背景噪声均值为 I_{mean} 和标准差为 σ_b 。

(3)求该点灰度 I_{now} 与 I_{max} 的差值 Δ 。当 $\Delta < b(I_{\text{max}} - I_{\text{mean}} - \alpha \cdot \sigma_b)$ 时,认为该点是星像的内点,StateFlag 标记为 1,进入步骤(1);当 $\Delta \geq b(I_{\text{max}} - I_{\text{mean}} - \alpha \cdot \sigma_b)$ 时,进入步骤(4)。

(4)该点灰度 I_{now} 与预测背景值 I_{mean} 比较,若 $I_{\text{now}} \leq I_{\text{mean}} + \alpha \cdot \sigma_b$,则判断该点为背景点,StateFlag 标记为 0;若 $I_{\text{now}} > I_{\text{mean}} + \alpha \cdot \sigma_b$,则判断为星

像的边缘点,StateFlag 标记为 1。进入步骤(1)。

(5)当这一圈的像素全部扫描完以后,判断本圈像素是否都是背景点,若都是背景点,则停止生长,进入 Step2 对下一个分块进行处理;若不都是背景点,则 Radius=Radius+1,进入步骤(1)。

3 实验及分析

3.1 仿真星图实验

采用简易高斯模型^[13],使 3 等星在星图中的灰度为 225,接近饱和值,在 8 位的星图数据中显示亮于 6 等以上的星。视场为 20°×20°,阵面大小 1 024×1 024,采用 SAO 星表,以均匀概率在全天区随机产生一个视轴指向,产生一幅标准星图,验证算法的提取能力。该星图中共有 36 颗亮于 6 等的星,部分数据如表 1。

表 1 部分星数据

Tab. 1 A part of star data

序号	星号	星等	赤经	赤纬
1	96015	5.1	1.755 8	0.308 0
2	95599	6	1.669 4	0.219 4
3	96161	5.7	1.788 2	0.282 8
4	96074	3.4	1.768 4	0.225 1
5	95543	6	1.658 4	0.255 7
6	96294	5.9	1.817 0	0.173 6
7	95419	5.7	1.634 0	0.312 5
8	80112	5.9	2.183 2	0.362 1
9	79799	5.4	2.075 5	0.347 0
10	95912	1.9	1.735 3	0.286 2

定义提取率 η_s 为正确提取出的星数与原星图中总星数的比值,误提取率 η_e 为提取出的错误区域数与原星图中总星数的比值。

不加任何噪声进行提取方法原理验证,共提取出 36 颗星, $\eta_s = 100\%$, $\eta_e = 0$ 。采用质心法得到的精度为 0.028 2 pixel。图 4 给出了 36 颗星的定位误差分布。

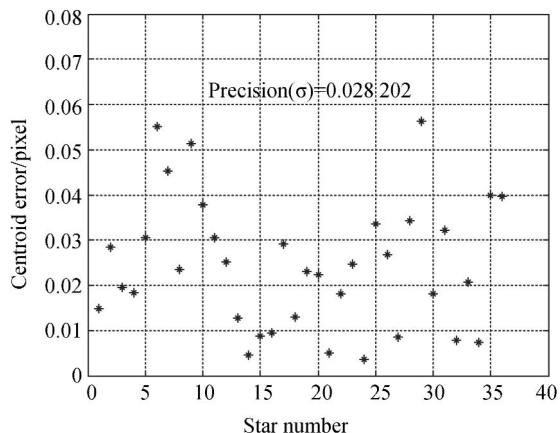
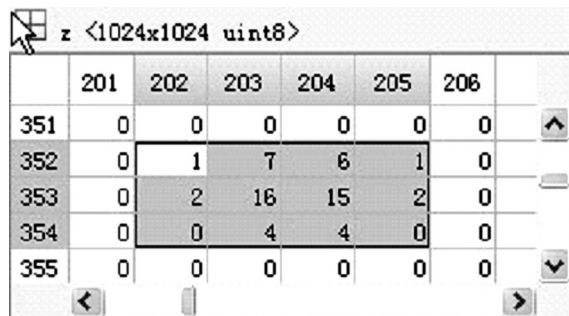


图 4 质心定位误差分布

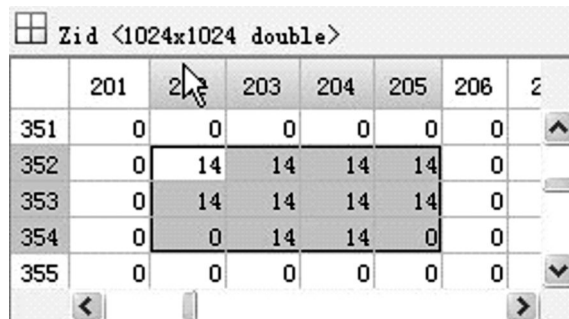
Fig. 4 Centroiding error distribution

以星号为 95830 的弱星为例,星等是 5.6,对照其原始数据和提取出的数据区域,如图 5,(a)中是灰度值,(b)中数字“14”为第 14 颗星的标示符,标记行列坐标和原始星像相符,在不加噪声的情况下,提取出的数据完全正确。



(a)原始数据

(a)Original data



(b)提取标记

(b)Extracting labels

图 5 提取星像区域对比

Fig. 5 Comparison between gray data and extracting labels

根据对实拍星图的观测,APS-CMOS 星图存在较大的非均匀性,背景噪声近似符合高斯分布,且均值远大于标准差。大面积低灰度背景区域的直方图的曲线比较光滑,近似服从 Gauss 分布;而高灰度区域主要由点状或近似点状成像的目标信号和器件噪声和辐射噪声组成^[14]。这里的器件噪声和辐射噪声体现为脉冲噪声,对于现代星敏感器较少,而且可以通过一幅均匀场景的成像很容易判断检测出这种噪声,所以此仿真中不考虑。图 6 为一幅 10 位 A/D 采样的大气层内的实拍星图数据及其直方图统计。

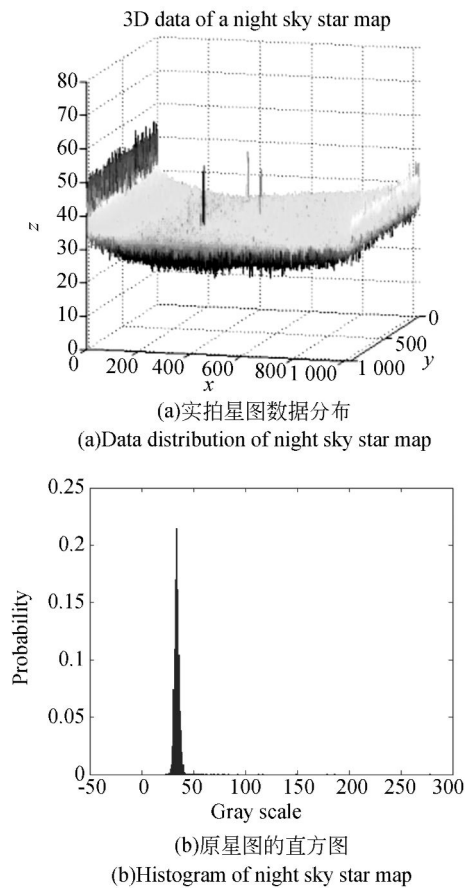


图 6 实拍星图数据及其直方图

Fig. 6 Night sky star map data and its histogram

基于对实拍星图均值和标准差的考察,对仿真产生的标准星图加入不同的高斯噪声,分析其对星像提取的影响。

从表 2 中可以看出,在标准差一定时,质心定位精度受均值变化的影响不大。噪声均值为 20、标准差为 0.1 的提取效果与不加噪声几乎相等,主要是因为所加噪声由于方差非常小,在整型图

像数据中体现为一个灰度为 20 的电平,所以常值电平对本算法的提取精度没有影响,此结果也可以进一步说明均值对此星像提取方法影响不大,体现了公式(5)的合理性。

表 2 高斯噪声灰度标准差为 1 时的星像提取统计结果
Tab. 2 Statistic result of star acquisition in Gaussian standard deviation of 1

均值/灰度	提取率 η_e	误提取率 η_f	质心精度/像素
5	100%	0	0.126 0
10	100%	0	0.100 1
15	100%	0	0.114 6
20	100%	0	0.112 9
25	100%	0	0.110 9
30	100%	0	0.106 9
35	100%	0	0.113 1
40	100%	0	0.095 6

表 3 给出了随着标准差的提高,提取率和质心提取精度的变化情况,直到 $\sigma=1.5$ 仍保持 100% 的提取率,在非常不利 $\sigma=2.5$ 信噪比低至 6 dB 强噪声条件下,还有 86.11% 的提取率,和 8.33% 的误提取率。提取失败及误提取的,都是针对弱信号,强星像均可正确提取。通过提高阈值,调整 α 和 β ,可降低误提取率。当 α 从上述实验中的值 2 提高到 3 时,误提取率为 0,提取率为 69.44%,36 颗样本星提取了 25 颗,达到了工程应用要求。

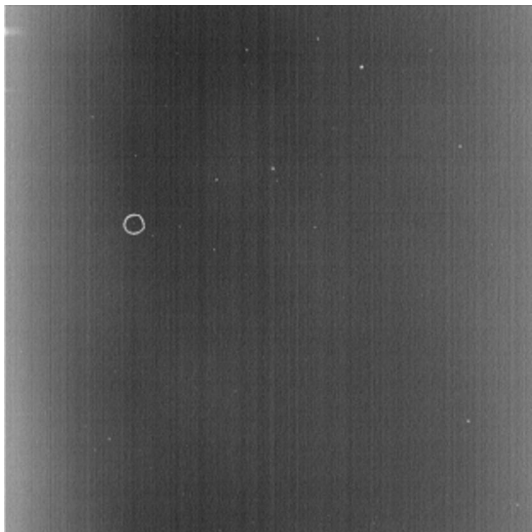
表 3 高斯噪声灰度均值为 20 时的星像提取统计结果
Tab. 3 Statistic result of star acquisition in Gaussian mean value of 20

标准差/灰度	提取率 η_e	误提取率 η_f	质心精度/像素
0.1	100%	0	0.027 9
0.5	100%	0	0.050 7
1	100%	0	0.112 9
1.5	100%	0	0.133 1
2	97.14%	0	0.185 4
2.5	86.11%	8.33%	0.219 6
3	75%	13.89%	0.256 6

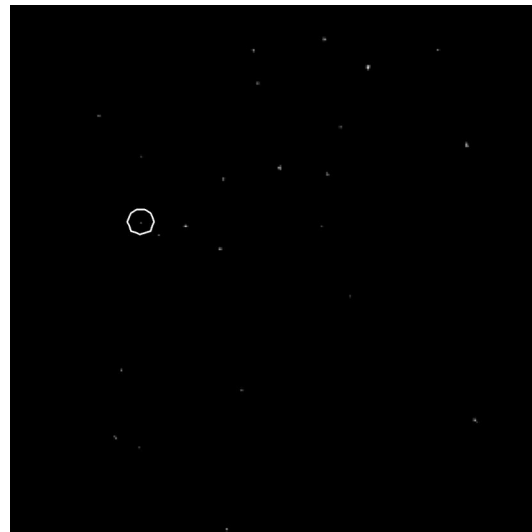
3.2 实拍星图实验

图 7 为图 6 为方便观察经对比度增强处理的

原始星图和提取后的星像区域标示图,对比图 7 两幅图像,共提取出 24 颗星,全部正确。



(a)原始星图 (经对比度增强)
(a)Night sky star map(contrast enhanced)



(b)提取出的星像效果
(b)Extracted star images

图 7 原始星图及提取效果

Fig. 7 Night sky star map and extracted images

z <1024x1024 double>							
	249	250	251	252	253	254	
418	31	33	30	34	32	32	^
419	34	32	33	34	29	33	
420	34	35	33	36	33	33	
421	33	33	41	40	31	32	-
422	34	31	34	33	32	31	
423	33	33	31	34	31	33	
424	33	33	32	32	31	32	v

(a)原始数据
(a)Data of original star image

Zthresh <1024x1024 uint8>							
	249	250	251	252	253	254	
418	0	0	0	0	0	0	^
419	0	0	0	0	0	0	
420	0	0	0	0	0	0	
421	0	0	2	1	0	0	-
422	0	0	0	0	0	0	
423	0	0	0	0	0	0	
424	0	0	0	0	0	0	v

(b)原自适应阈值 $\mu+2\sigma$ 分割后的数据
(b)Data after adaptive threshold segmenting

Zid <1024x1024 double>							
	249	250	251	252	253	254	
418	0	0	0	0	0	0	^
419	0	0	0	0	0	0	
420	0	0	0	13	0	0	
421	0	0	13	13	0	0	-
422	0	0	13	0	0	0	
423	0	0	0	0	0	0	
424	0	0	0	0	0	0	v

(c)本文方法提取标记
(c)Extracted labels by proposed method

Znew <1024x1024 double>							
	249	250	251	252	253	254	
418	31	33	30	34	32	32	^
419	34	32	33	34	29	33	
420	34	35	33	0.6160	33	33	
421	33	33	5.1111	4.1111	31	32	-
422	34	31	0.2679	33	32	31	
423	33	33	31	34	31	33	
424	33	33	32	32	31	32	v

(d)本文方法处理后的数据
(d)Data after processing by proposed method

图 8 在图 7 标示圈内的数据对比

Fig. 8 Comparison of data about star image circle labeled in Fig. 7

从图 8 的数据对比中可以看出,在星像信噪比低至 4.9 dB 的情况下,依然可以提取出微弱星像,且只针对提取出的各像素进行单独背景去除,使星像灰度接近其真实值,计算得到的质心位置为(420.965 6, 251.467 7)像素。若用一般的阈值分割后再进行提取,则只有 2 个像素可以提取出来,而且像素灰度与实际值相差较大,如图 8(b)。说明本方法具有较强的弱星探测提取能力。

仿真实验中在不加噪声的情况下,提取星的区域与标准图完全一致,说明了本方法的正确性。真实星图的星像并不是标准的高斯分布,实用中能够更完整地提取出星像显得更为重要。从图 5 和图 8 中可以看出,本方法可以最大程度地符合原有星像区域和灰度数据,这间接保证了质心提取精度。

4 结 论

本文研究了星敏感器星像提取关键环节的实

时处理效率和抗噪声能力。首先进行像阵分区并确定局部阈值,将其作为分区内峰值像素可否作为星像生长种子点的判别准则,一次必要的全图扫描即可完成该过程。建立了针对生长种子点的自适应局部阈值求取方法,根据星像灰度分布参数设立了环形生长终止的判别条件。由于该过程只针对星图有限个种子点周围的局部区域进行处理,相比其它算法多次全图重复扫描并处理背景无用区域的无谓时间消耗,本方法较大程度地节约了处理时间。在 $N(20, 2.5^2)$ 高斯灰度噪声最不利仿真条件下进行了星像提取率实验,对于分布有 36 颗亮于 6 Mv 恒星的仿真星图,误提取率为 0,仍有 69.44% 的提取率,完全可以满足工程要求。对于实拍星图的信噪比低于 4.9 db 的弱星,均能准确提取其星像,证明了该算法的优良抗噪声性能。本方法融合了局部背景预测、自适应局部阈值以及适合星像特点的区域生长等有效方法于星图星像提取环节,适应性强,具有工程实用价值。

参考文献:

- [1] 魏新国,张广军,江洁. 星敏感器中星图图像的星体细分定位方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003(9): 812-815.
WEI X G, ZHANG G J, JIANG J. Subdivided locating method of star image for star sensor[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003(9): 812-815. (in Chinese)
- [2] MORTARI D, ROMOLI A. StarNav III: a three fields of view star tracker[C]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings 2002*: 47-57.
- [3] MORTARI D, BRUCCOLERI C, La ROSA S, et al.. CCD data processing improvements for star cameras[C]. *International Conference on Dynamics and Control of Systems and Structures in Space 2002*, KingCollege, Cambridge, England, 2002.
- [4] LIEBE C C. Accuracy performance of star trackers-a tutorial[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 587-599.
- [5] 田金文,欧阳桦,郑胜,等. 一种星图中星的提取方法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2005(4): 38-40.
TIAN J W, OU Y H, ZHENG S, et al.. Method of star acquisition from star image[J]. *J. Hua-*
- [6] 陆敬辉,王宏力,郑佳华,等. 一种改进的星图中星提取方法[J]. 传感器与微系统, 2008(6): 31-33.
LU J H, WANG H L, ZHENG J H, et al.. Improved approach to star extraction from star image[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2008(6): 31-33. (in Chinese)
- [7] 崔祥祥,王宏力,陆敬辉. 一种新的星图中星的提取方法[J]. 传感器与微系统, 2011(4): 17-18.
CUI X X, WANG H L, LU J H. A new method for star extraction from star image[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011(4): 17-18. (in Chinese)
- [8] 王洪涛,罗长洲,王渝,等. 基于背景自适应预测的星点提取算法[J]. 光学技术, 2009(3): 412-414.
WANG H T, LUO C ZH, WANG Y, et al.. Algorithm for star extraction based on self-adaptive background prediction[J]. *Optical Technique*, 2009(3): 412-414. (in Chinese)
- [9] 李真真,魏宏刚. 亮背景下形态学星点目标提取算法[J]. 光电工程, 2011(12): 23-27.
LI Z Z, WEI H G. The algorithm of star extraction based on mathematical morphology in the bright-background[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011

zhong Univ. of Sci. & Tech. : Nature Science Edition, 2005(4): 38-40. (in Chinese)

- (12): 23-27. (in Chinese)
- [10] 张辉,钟建勇,袁家虎,等. 电路噪声对星敏感器星点定位精度的影响[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 1052-1056.
ZHANG H, ZHONG J Y, YUAN J H, *et al.*. Circuit noise effects on star sensor position accuracy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1052-1056. (in Chinese)
- [11] 李学夔,郝志航,李杰,等. 星敏感器的星点定位方法研究[J]. 电子器件, 2004(4): 571-574.
LI X K, HAO Z H, LI J, *et al.*. The research on the method of the stars position determination of the star sensor[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2004(4): 571-574. (in Chinese)
- [12] NEUMANN N, SAMAAN M, CONRADT M, *et al.*. Attitude determination for the SHEFEX 2 mission using a low cost star tracker[C]. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1801 Alexander Bell Dr., Suite 500 Reston VA 20191-4344 USA, 2009.
- [13] 王海涌,周文睿,赵彦武. 简易高斯灰度扩散模型的误差分析及适用性研究[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 711002.
WANG H Y, ZHOU W R, ZHAO Y W. Error analysis and applicability study on simplified gaussian gray diffusion model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 711002. (in Chinese)
- [14] 陈维真,张春华,周晓东. 基于局部直方图高斯拟合的星图背景性质研究[J]. 红外技术, 2008(4): 230-233.
CHEN W Z, ZHANG C H, ZHOU X D. Study of star-sky image background characteristics based on local-histogram gaussian fitting method[J]. *Infrared Technology*, 2008(4): 230-233. (in Chinese)

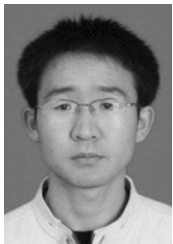
作者简介:



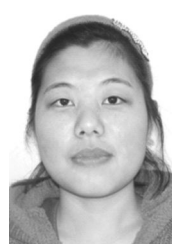
王海涌(1969—),男,河北唐山人,讲师,2004年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事天体敏感器和天文导航方面的研究。E-mail: why@buaa.edu.cn



薛晓峰(1981—),男,山西运城人,空军指挥学院博士后,2008年于空军工程大学获得博士学位,主要从事军事电子信息系统及效能评估方面的研究。E-mail: yfan_003@163.com



武文卿(1984—),男,河北张北人,硕士研究生,2008年于北京航空航天大学获得学士学位,主要从事星敏感器和天文导航技术方面的研究。E-mail: fan-cybuaa_wwq@163.com



赵彦武(1987—),女,河北邢台人,硕士研究生,2011年于北华航天工业学院获得学士学位,主要从事星敏感器和天文导航技术方面的研究。E-mail: yjg-zyw@126.com